



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.357.7+669.248.7+546.742+661.741.1

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022



АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ И АЦЕТАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

Евгений Геннадиевич Афонин

Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств, Калуга, Россия
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Аннотация. Гальванические покрытия никелем широко применяются в промышленности для защитно-декоративной отделки и изменения физико-механических свойств поверхности стали, меди, латуни, бронзы, алюминия, сплавов цинка и других металлических материалов. Никелирование чаще всего проводят электрохимическим осаждением из водных растворов, содержащих соли или комплексы никеля. В настоящей работе представлен обзор литературных данных по водным ацетатным электролитам никелирования, которые по химической природе являются промежуточными между простыми и комплексными. Предложена классификация электролитов, содержащих никель(+2) и ацетат-ион, по химическому составу, приведены некоторые технологические характеристики этих электролитов и физико-механические свойства покрытий. Например, из электролита с pH 5, содержащего 100 г/дм³ ацетата никеля, 30 г/дм³ хлорида никеля, 20 г/дм³ ацетата натрия, 30 г/дм³ борной кислоты, 0,1 г/дм³ лаурилсульфата натрия, при температуре 50 °С, катодной плотности тока 4–5 А/дм² получают твердое покрытие никелем на мягкой стали (катодный выход по току 87 %, рассеивающая способность электролита 7,6–9,6 %). В обзоре также обсуждаются способы приготовления ацетатных электролитов никелирования, в которых в качестве исходных веществ используют никель, его гидроксокарбонат, хлорид, сульфат, ацетат. Приведены литературные данные о растворимости ацетата никеля в воде, экспериментально оценены растворимости тетрагидрата ацетата никеля в водных растворах некоторых веществ и в большом числе органических растворителей различной природы: карбоновых кислотах, спиртах, простых и сложных эфирах, амидах карбоновых кислот, углеводородах, хлорированных углеводородах и других. Представлены сведения о кристаллической структуре тетрагидрата ацетата никеля(+2), а также о комплексообразовании никеля(+2) с ацетат-ионами в водном растворе.

Ключевые слова: ацетат никеля, комплексообразование, растворимость тетрагидрата ацетата никеля, кристаллическая структура тетрагидрата ацетата никеля, гальваническое никелирование, химический состав электролита, ацетатный электролит никелирования, ацетатно-хлоридный электролит никелирования, хлоридно-ацетатный электролит никелирования, ацетатно-формиатный электролит никелирования, ацетатно-аминоацетатный электролит никелирования, технологическая характеристика электролита, приготовление электролита никелирования, отработанный электролит никелирования.

Для цитирования: Афонин Е. Г. Ацетаты никеля и ацетатные электролиты для получения покрытий никелем // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 178–186. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022. EDN: <https://elibrary.ru/GNQLXR>.

Review article

NICKEL ACETATES AND ACETATE ELECTROLYTES FOR NICKEL PLATING

Evgeniy G. Afonin

Kaluga research institute of telemechanical devices, Kaluga, Russia
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Abstract. Electrodeposited nickel is widely used as corrosion protective decorative coating and for change of physico-mechanical characteristics of metal surfaces. Nickel films are usually produced from aqueous solutions of nickel salts or complexes. In the present work the literature data on aqueous acetate electrolytes for nickel electroplating are reviewed. Chemical classification, some technological characteristics of electrolytes containing nickel(+2) and acetate-ion are presented in the article. For instance hard nickel film on mild steel can be electrochemically deposited (pH 5, bath temperature 50 °C, cathode current density 4-5 A/dm²) from solution containing

© Афонин Е. Г., 2025

100 g/dm³ nickel acetate, 30 g/dm³ nickel chloride, 20 g/dm³ sodium acetate, 30 g/dm³ boric acid, 0,1 g/dm³ sodium lauryl sulfate (cathode current efficiency 87 %, throwing power 7,6-9,6 %). Methods for preparing of nickel acetate galvanic baths with nickel metal, nickel basic carbonate, nickel chloride, nickel sulfate, nickel acetate as precursors are described in the review. Literature data on solubility of nickel acetate in water are given, solubilities of Ni(CH₃COO)₂·4H₂O in some aqueous solutions and in non-aqueous solvents(carboxylic acids, alcohols, ethers, esters, amides of carboxylic acids, hydrocarbons, chlorinated hydrocarbons and others) are experimentally estimated. Crystal structure of nickel acetate tetrahydrate, complex formation between nickel (+2)-ion and acetate-ion in the aqueous solution are described.

Keywords: nickel acetate, complex formation, solubility of nickel acetate tetrahydrate, crystal structure of nickel acetate tetrahydrate, nickel electrodeposition, nickel electroplating solution, chemical composition of nickel electrolyte, nickel acetate electrolyte, nickel acetate-chloride electrolyte, nickel chloride-acetate electrolyte, nickel acetate-formate electrolyte, nickel acetate-aminoacetate electrolyte, technological characteristic of electrolyte, nickel electrolyte preparing method, nickel spent electrolyte.

For citation: Afonin, E. G. (2025). Nickel acetates and acetate electrolytes for nickel plating. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 178-186. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022. EDN: <https://elibrary.ru/GNQLXR>.

ВВЕДЕНИЕ

Гальванические покрытия никелем широко применяются в промышленности для защитно-декоративной отделки поверхностей стали и цветных металлов, для защиты от коррозии при повышенной температуре в щелочной среде и в растворах органических кислот, как подслои для получения покрытий другими металлами (медь, хром) на сталь, для повышения твердости и износостойкости поверхности, улучшения паяемости [1–3].

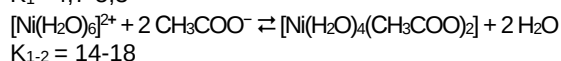
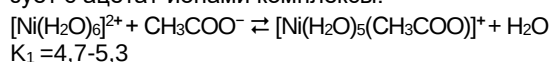
В 1916 г. Оливер П. Уоттс [4] опубликовал состав наиболее известного электролита никелирования, содержащего 240 г/дм³ сульфата никеля NiSO₄·7H₂O, 20 г/дм³ хлорида никеля NiCl₂·6H₂O (или 30 г/дм³ хлорида натрия NaCl) и 20 (или 22) г/дм³ борной кислоты H₃BO₃ (t = 70 °C, i_k = 22–33 А/дм²). Сейчас термин «электролиты Уоттса» используют для чаще других применяемых в промышленности сульфатно-хлоридных электролитов никелирования с борной кислотой, которые включают 150–400 г/дм³ гексагидрата сульфата никеля, 20–90 г/дм³ гексагидрата хлорида никеля (или вместо него 10–40 г/дм³ хлорида натрия), 15–50 г/дм³ борной кислоты (рН 2,0–5,2, t = 30–80 °C, i_k = 1–11 А/дм², скорость покрытия 25–85 мкм/ч) [5, 6].

В настоящее время известны электролиты гальванического никелирования различного химического состава, в частности кислые некомплексные хлоридные, сульфатные, сульфатно-хлоридные, сульфаматные, тетрафтороборатные, гексафторосиликатные, метансульфонатные, слабощелочные комплексные дифосфатные, фосфонатные, дикарбоксилатные, глюконатные, цитратные, аминокетатные, этилендиаминтетраацетатные.

В представленной статье рассмотрены составы, способы приготовления и некоторые технологические характеристики водных электролитов никелирования, содержащих ацетат-ион, а также приведены сведения о строении и физико-химических свойствах ацетата никеля.

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ НИКЕЛЯ(+2) С АЦЕТАТ-ИОНОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

В водном растворе катион никеля(+2) образует с ацетат-ионами комплексы:



Ацетат-ион в водном растворе не образует с

катионом никеля(+2) хелатных комплексов [16], термодинамическая устойчивость ацетатных комплексов никеля(+2) невелика и недостаточна для того, чтобы удерживать никель(+2) в водном растворе в нейтральной и щелочной средах; в этих условиях из раствора в осадок выпадают гидроксиацетаты или гидроксид никеля(+2). Значительная степень связывания никеля(+2) в ацетатные комплексы возможна только при высокой концентрации ацетат-ионов и высоком молярном соотношении ацетат/никель(+2) в водном растворе.

Электролиты никелирования, содержащие ацетат, по химической природе являются промежуточными между простыми и комплексными.

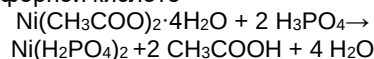
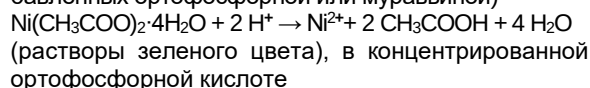
КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ(+2), ИХ СТРОЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Из водного раствора при комнатной температуре выделяются зеленые кристаллы Ni(CH₃COO)₂·4H₂O. Нагреванием тетрагидрата ацетата никеля(+2) при t = 90–120 °C (температура начала дегидратации 60–90 °C [17–20]) можно получить безводный ацетат никеля(+2), но этот процесс осложняется пиролизом с выделением уксусной кислоты [17–21].

В настоящей работе для оценки растворимости использовали Ni(CH₃COO)₂·4H₂O ТУ 6-09-02-516-91 марки «чда», который дополнительно очищали изотермической кристаллизацией из подкисленного уксусной кислотой водного раствора при 5–8 °C и высушивали на воздухе при комнатной температуре (рис. 1), а также химические реагенты и органические растворители марок «чда», «хч» или «ос.ч».

Ni(CH₃COO)₂·4H₂O легко растворим в воде (табл. 1). При нагревании водного раствора ацетата никеля в осадок выпадают малорастворимые продукты его гидролиза зеленого цвета, которые растворяются после остывания раствора.

Ni(CH₃COO)₂·4H₂O растворим в водных растворах кислот (серной, хлороводородной, азотной, разбавленных ортофосфорной или муравьиной)



(раствор желто-зеленого цвета), легко растворим в водных растворах аммиака

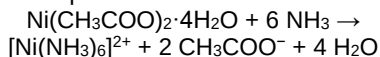
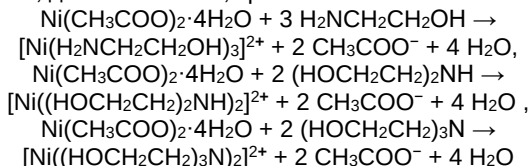
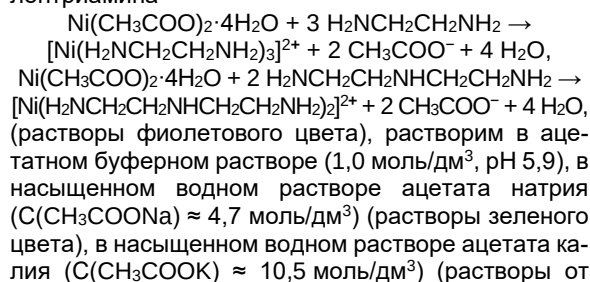


Рисунок 1 – Кристаллический $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Figure 1 – Crystalline $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

(раствор сине-фиолетового цвета), моноэтаноламина, диэтаноламина, триэтаноламина

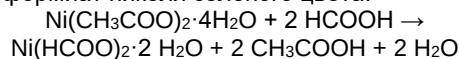


(растворы синего цвета), этилендиамина, диэтилентриамины



желтого до зелено-желтого цвета при увеличении концентрации ацетата никеля).

Тетрагидрат ацетата никеля при комнатной температуре растворим в уксусной, пропионовой, масляной кислотах, мало растворим в олеиновой кислоте; в муравьиной кислоте $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ превращается в малорастворимый кристаллический формиат никеля зеленого цвета:



Тетрагидрат ацетата никеля при комнатной температуре растворим в формамиде, диметилформамиде, диметилсульфоксиде, этиленгликоле, глицерине, умеренно растворим в метаноле, этаноле, мало растворим в пропанол-2, бутанол-1, 2-метилпропанол-1, 3-метилбутанол-1, октанол-1, бензиловом спирте, очень мало растворим в ацетоне, циклогексаноне, ацетонитриле, этилацетате, бутилацетате, изамилацетате, 1,4-диоксане, практически нерастворим в диэтиловом эфире, тетрахлориде углерода, трихлорметане, дихлорметане, 1,2-дихлорэтаноле, гексане, вазелиновом масле, бензоле.

Определены стандартные молярные энтальпии образования и дегидратации $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [23].

Безводный ацетат никеля(+2) растворим в уксусной кислоте, из этого раствора кристаллизуется $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 0,5 \text{CH}_3\text{COOH}$ [24, 25]; достоверные и непротиворечивые сведения о растворимости безводной соли в других органических растворителях в литературе отсутствуют. Вещество разлагается при нагревании (по разным данным) выше 250–350 °С с образованием твердого остатка, содержащего преимущественно никель (в атмосфере H₂), карбид никеля (в инертной атмосфере) или оксид никеля(+2) (на воздухе) [17–21], а также большого числа газообразных продуктов пиролиза ацетат-иона и продуктов их вторичных превращений (уксусной кислоты, ацетона, кетена, муравьиной кислоты, этанола, диоксида углерода и других) [18–20].

Таблица 1 – Растворимость ацетата никеля(+2) в воде [22] (в г безводной соли в 100 г воды)

Table 1 – Solubility of nickel(+2) acetate in water [22] (g anhydrous salt in 100 g of water)

Температура	5	10	20	25	30	40	50	60	70
Растворимость	10,36	11,14	12,98	14,08	14,7	16,59	20,29	25,61	35,09

Таблица 2 – Кристаллографические параметры тетрагидрата ацетата никеля $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (моноклинная сингония, пространственная группа симметрии P2₁/c, число формульных единиц в элементарной ячейке (z) = 2)

Table 2 – Crystal data for nickel acetate tetrahydrate $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (monoclinic system, space group P2₁/c, number of formula units (z) = 2)

Параметры элементарной ячейки						Температура, К	Литература
a, Å	b, Å	c, Å	α, град	β, град	γ, град		
4,7485	11,6933	8,2247	90	92,524	90	1,5	[30]
4,764	11,771	8,425	90	93,6	90	295	[27]
4,760(1)	11,761(4)	8,419(4)	90	93,82(3)	90	295	[28]
4,777(1)	11,777(3)	8,437(2)	90	93,81(2)	90	295	[29]
4,8319(9)	11,900(2)	8,5531(17)	90	–	90	298	[31]
4,7769	11,7809	8,4171	90	93,826	90	300	[30]
4,75	11,77	8,44	90	93,6	90	–	[26]

АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ И АЦЕТАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

Таблица 3 – Химический состав и некоторые технологические характеристики водных ацетатных электролитов для получения покрытий никелем (t – рабочая температура электролита, i_k – катодная плотность тока, η_k – катодный выход по току, PC – рассеивающая способность электролита)

Table 3 – Chemical compositions and some technological characteristics of aqueous acetate electrolytes for nickel electrodeposition (t – temperature of operation, i_k – cathode current density, η_k – cathode current efficiency, PC – throwing power of electrolyte)

№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов, г/дм ³	t , °C	pH	i_k , А/дм ²	Свойства электролита и покрытия	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃	50 12	30		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 96,4 \%$	[66]
2	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃ HCON(CH ₃) ₂	124 6,2 5 мол. %	35	6,6		Электроосаждение никеля на импульсном обратном токе. Блестящее или полублестящее покрытие чистым никелем	[62]
3	Ацетат никеля Ацетат натрия H ₃ BO ₃ Лаурилсульфат натрия	100 20 30 0,1	50	5	6	Твердое никелевое покрытие на мягкую сталь. $\eta_k = 86,5 \%$, PC = 7,4 %	[69]
4	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O CH ₃ COONa·3H ₂ O CH ₃ COOH H ₃ BO ₃ Желатин Толуол-4-сульфокислота	62,2 13,6 12,0 18,5 1,0 1,0	25	5,25	2	Электроосаждение никеля при наложении переменного тока на постоянный. Зеркально-блестящее покрытие никелем	[55]
5	Ni(CH ₃ COO) ₂ NiCl ₂	190 30	48–50	3,5–5,0	2–15	Покрытие никелем с высокой пластичностью и прочностью	[56]
6	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O NiCl ₂ ·6H ₂ O	118 6	50	4,5	50 (доп.)	Электроосаждение никеля в импульсном режиме. Полублестящее, твердое, беспористое (9–12 мкм) покрытие никелем с редким питтингом. $\eta_k = 86,7–91,6 \%$	[64]
7	Ацетат никеля Хлорид никеля Ацетат натрия H ₃ BO ₃ Лаурилсульфат натрия	100 30 20 30 0,1	50	5	4–5	Твердое никелевое покрытие на мягкую сталь. $\eta_k = 87 \%$, PC = 7,6–9,6 %	[69]
8	Ацетат никеля Хлорид никеля CH ₃ COOH H ₃ BO ₃	150 45 15,7 35	40	5	1–2	Гладкое, однородное, блестящее покрытие никелем. $\eta_k = 95 \%$, PC = 52 %	[65]
9	Ацетат никеля Хлорид никеля	26–37,5 30–37,5	54	4,0–5,5	1,6–21,5	Светлое, полублестящее, пластичное покрытие никелем	[35]
10	Ni(CH ₃ COO) ₂ NiCl ₂ CH ₃ COOH SeO ₂	100 100 35 см ³ /дм ³ 0,1–0,3	43	3–3,5	2,6–5,2	Блестящее покрытие никелем	[34]
11	Хлорид никеля Ацетат аммония 1,2,3-Трис(β-цианэтокси)пропан	200–00 50–75 0,02–0,06	20–35	3,4–4,5	3–10	Блестящее покрытие никелем с равномерным распределением микротрещин (подслой для покрытия хромом)	[40]
12	NiCl ₂ ·6H ₂ O Ацетат натрия NaCl	142 80 25	40	5,5	1–10	Никелевое покрытие на медь, латунь, сталь	[43]
13	NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COONH ₄	61–324 15–30	20	4,8	1–4	PC = 15–27 %	[73]
14	NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COONH ₄	226 28	20	4,8	1–9	Электроосаждение никеля в импульсном режиме. Наноструктурированное, малопористое (до 20 мкм) покрытие никелем с хорошей адгезией к стальной основе. PC = 10–19 %	[70]

Продолжение таблицы 3 / Continuation of table 3

1	2	3	4	5	6	7	8
15	Хлорид никеля Ацетат никеля	375 100	20–25	5–5,5	10	Блестящее покрытие никелем	[36]
16	Сульфат никеля Ацетат натрия NaCl (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	80–120 15–20 15–20 30	18–20	4–5,5	3–4	Никелевое покрытие на алюминий и его сплавы	[38]
17	NiSO ₄ ·6H ₂ O Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COOH 2-Фенил-5-бензимидазол-сульфоновая кислота или Сахаринат натрия Сополимер L-аргинина и 1,4-бутандиола диглицидилового эфира	185 или 365 25 10 1,35 0,1-1,0 0,15 0,010	60	4 или 4,6	0,1–12	Блестящее, однородное никелевое покрытие на латуни	[81, 82]
18	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O Ni(HCOO) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃	50 44 12	30		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 99,8\%$	[66]
19	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O Ni(HCOO) ₂ ·4H ₂ O Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃	50 44 64,5 12	40		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 98,3\%$	[66]
20	Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COOH	383 11 10		1,72	1,6		[61]
21	Ацетат никеля KCl или NiCl ₂ Цитрат калия Сахаринат натрия 2-Бутин-1,4-диол Лаурилсульфат натрия	150 40 30 0 или 0,5 0 или 0,5 0 или 0,2	50	4	1–5	Гладкое, твердое покрытие никелем, хорошо сцепленное с основой из мягкой стали. η_k высокая	[76]
22	NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COONa·3H ₂ O H ₂ NCH ₂ COOH	19 245 15		5,0	0,5 или 5,0	Никелевое покрытие (94,57 % Ni) без отдельных зерен, но с трещинами. $\eta_k = 51,3$ или 21,8 %	[67]

Определена кристаллическая структура тетрагидрата ацетата никеля(+2) (табл. 2). В кристаллах Ni(CH₃COO)₂·4H₂O (рис. 2) имеются дискретные центросимметричные немного искаженные октаэдрические комплексы [Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂], в которых центральный катион никеля(2+) связан в транс-положениях с двумя атомами кислорода двух монодентатных ацетат-ионов, а также с четырьмя атомами кислорода молекул воды.

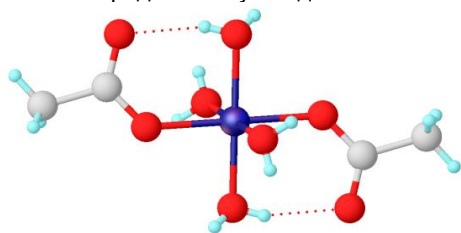


Рисунок 2 – Строение комплекса
[Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂]

Figure 2 – Structure of complex [Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂]

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНЫХ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

В работе [32] изучены катодное и анодное поведение никеля в водных растворах с концентрацией уксусной кислоты 0,5–13 моль/дм³, в статье

[33] измерена электропроводность водного раствора ацетата никеля.

Создано большое число электролитов никелирования, содержащих ацетат-ион [34–84]. Заметная часть публикаций посвящена изучению электрохимических особенностей, кинетики и механизма осаждения никеля на катодах, растворения никелевого анода и других аспектов поведения ацетатных электролитов никелирования [44, 45, 47, 51, 52, 57, 71, 80]. Установлено, что введение ацетат-ионов в электролит никелирования, например в электролит Уоттса [37], в сульфаматный электролит [39], или замена борной кислоты на ацетат щелочного металла значительно увеличивает буферную ёмкость электролитов и, что особенно важно, удерживая оптимальное значение pH в прикатодном слое электролита, предотвращает нежелательное образование гидроксида никеля(+2) и гидроксосолей никеля(+2), которые могут включаться в катодный осадок, делая его шероховатым и хрупким [5, 41, 45, 55, 59, 67, 68, 73, 75].

Известны электролиты никелирования, содержащие ацетат-ион, которые предложены для применения в промышленности (табл. 3); вероятно, первый из них разработан в 1936 г. [34].

С химической точки зрения истинным ацетатным электролитом гальванического никелирования можно считать слабокислый электролит, включающий в качестве базовых компонентов ацетат никеля(+2) и буферную систему, состоящую из ацетата щелочного металла (или аммония) и уксусной

кислоты, которая обеспечивает сохранение заданного интервала pH электролита в объеме и в прикатодном слое, а также значительную степень связывания никеля(+2) в комплекс. В электролитах никелирования этой группы значимыми частицами, влияющими на скорость электромиграции, механизм и скорость электроразряда на катоде и другие процессы, являются аква-ионы $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ и ацетатные комплексы никеля(+2) $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{CH}_3\text{COO})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{CH}_3\text{COO})_2]$. Из известных электролитов к таковым можно отнести электролиты (3, 4) (табл. 3) и с большой натяжкой электролиты (1, 2) (табл. 3).

Большая часть электролитов никелирования, содержащих ацетат, является ацетатно-хлоридными (5–8) (табл. 3), хлоридно-ацетатными (9–15) (табл. 3) и сульфатно-ацетатными (16, 17) (табл. 3). Ацетатно-хлоридные электролиты содержат в высокой концентрации ацетат никеля и, в значительно меньшей, – хлорид никеля, который добавляют для облегчения растворения никелевых анодов. В хлоридно-ацетатных и сульфатно-ацетатных электролитах преобладающим по концентрации компонентом является хлорид (или сульфат) никеля, а ацетат никеля или ацетат щелочного металла играет роль буферной добавки (основные частицы $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{CH}_3\text{COO})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}(\text{CH}_3\text{COO})]$). Электролиты (18, 19) (табл. 3) являются ацетатно-формиатным и ацетатно-формиатно-сульфатным соответственно. Композиции (21, 22) (табл. 3) представляют собой ацетатно-хлоридный электролит с добавкой небольшого количества цитрат-ионов или аминокислоты, связывающих некоторую часть ионов никеля(+2) в прочный цитратный и аминокислотные комплексы соответственно.

Разработанные электролиты никелирования, содержащие ацетат, работают при комнатной или умеренно повышенной температуре, катодной плотности тока обычно 1–5 А/дм² и обеспечивают выход покрытия по току 87–99 %, рассеивающая способность до 52 % (табл. 3).

Применение импульсного режима электролиза в электролитах никелирования, содержащих ацетат (2, 6, 14) (табл. 3) позволяет улучшить внешний вид, повысить микротвердость никелевого покрытия, увеличить до 50 А/дм² допустимую катодную плотность тока по сравнению со стационарным режимом [62, 64, 70, 72, 83].

В изобретениях [36, 40] предложены хлоридно-ацетатные электролиты для получения покрытия никелем с высоким внутренним напряжением, которые растрескиваются с образованием большого числа равномерно распределенных по поверхности микротрещин, что обеспечивает высокую коррозионную стойкость и блеск двуслойного покрытия никель-хром [3].

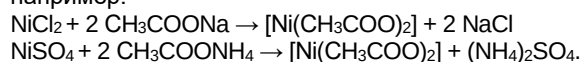
Известны водные электролиты никелирования, содержащие, кроме ацетата никеля, 5 мол.% формамида, метилформамида или диметилформамида [48, 49, 62] (2) (табл. 3), а также неводные (те же растворители и диметилсульфоксид) ацетатные электролиты никелирования [85–88]. Например, из формидного электролита с концентрациями ацетата никеля 0,2 моль/дм³, ацетата аммония 0,2 моль/дм³, борной

кислоты 0,1 моль/дм³ при $t = 40\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$, pH 5,4–6,4 (HCl), $i_k = 0,5\text{ А/дм}^2$ получают твердое, зеркально-блестящее, мелкокристаллическое покрытие никелем на меди и латуни ($\eta_k = 88,7$ и $86,4\text{ \%}$) [87].

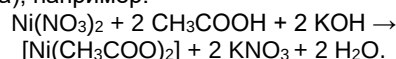
ПРИГОТОВЛЕНИЕ ВОДНЫХ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Источником никеля(+2) при приготовлении ацетатных электролитов гальванического никелирования могут служить следующие производимые химической промышленностью вещества: $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 7(6)\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCO}_3 \cdot m\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{H}_2\text{NSO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{BF}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{SO}_3)_2$. Источником ацетат-ионов являются: уксусная кислота CH_3COOH , ацетат натрия $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, ацетат калия CH_3COOK , ацетат аммония $\text{CH}_3\text{COONH}_4$. Источником никеля(+2) и ацетат-ионов может быть тетрагидрат ацетата никеля $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (CAS 6018-89-9, ТУ 6-09-02-516-91, $M = 248,85\text{ г/моль}$).

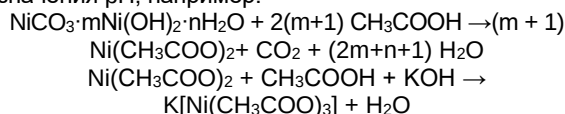
При смешивании водных растворов соли никеля(+2) и ацетата щелочного металла (или аммония) образуется электролит никелирования, содержащий кроме ацетат-иона также второй анион, например:



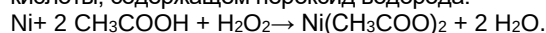
Электролиты того же состава готовят смешиванием растворов соли никеля(+2) и уксусной кислоты с последующим доведением pH до заданного значения путем добавления раствора щелочи (или аммиака), например:



Для приготовления ацетатных электролитов гальванического никелирования, не содержащих иных анионов, кроме ацетат-иона, можно сначала растворить гидрокарбонат никеля(+2) в избытке водного раствора уксусной кислоты, а затем прибавить раствор основания до достижения заданного значения pH, например:



или растворить кристаллический ацетат никеля(+2) $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в водном растворе ацетата щелочного металла (или аммония) и, при необходимости, добавить уксусную кислоту. Электролиты того же химического состава можно приготовить, растворяя порошок металлического никеля в растворе уксусной кислоты, содержащем пероксид водорода:



ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ацетатные электролиты никелирования обычно устойчивы при работе и хранении и могут использоваться длительное время. Если возникает необходимость их замены на свежие, то образуются отработанные электролиты, которые

содержат ацетат никеля(+2), ацетаты щелочных металлов и некоторые другие вещества. Извлечение ценного и токсичного [89, 90] никеля(+2) из отработанных электролитов и промывных сточных вод можно осуществить, в частности, химическими [91–94] и электрохимическими [95, 96] методами. Ацетат-ион нетоксичен и не является коммерчески ценным компонентом этого класса отходов гальванического производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Никель(+2) образует с ацетат-ионами в водном растворе комплексы с невысокой термодинамической устойчивостью, поэтому ацетатные электролиты никелирования являются слабокислыми, а по химической природе занимают промежуточное положение между простыми и комплексными электролитами. Введение ацетат-ионов в традиционные электролиты никелирования значительно увеличивает их буферную ёмкость, позволяет удерживать оптимальное значение pH в прикатодном слое электролита, повышает микротвердость и внутреннее напряжение, а также влияет на скорость роста и морфологию покрытий никелем.

Хорошая растворимость в воде ацетата никеля(+2), ацетатов натрия, калия, аммония позволяет создавать ацетатные электролиты гальванического никелирования с довольно высокими концентрациями компонентов. Из слабокислых водных электролитов, содержащих ацетат никеля, ацетат щелочного металла или аммония, при добавлении облегчающих растворение анода, выравнивающих, блескообразующих, антипittingовых и иных добавок можно получать качественные покрытия никелем на различных материалах. Значительная растворимость тетрагидрата ацетата никеля во многих органических растворителях, а также в насыщенном водном растворе ацетата калия дает возможность готовить маловодные ацетатные электролиты гальванического никелирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Di Bari, G.A. (2010). Electrodeposition of nickel // Modern electroplating. Edited Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Hoboken. NJ. USA: John Wiley & sons. Inc., P. 79-114.
2. Kudryavtsev, N.T. (1979). Electrochemical metal coatings. Moscow: Chemistry publ. 352 p. (In Russ.).
3. Mamaev, V.I. & Kudryavtsev, N.T. (2014). Electrodeposition of nickel: study guide. Moscow: D.I. Mendeleev RCTU. 198 p.
4. Watts, O.P. (1916). Rapid nickel plating // Transactions of the American electrochemical society, 29, 395-403.
5. Dennis, J.K. & Such, T.E. (1993). Nickel and chromium plating. 3th edition. Cambridge. England: Woodhead publishing ltd., 449 p.
6. Rose, I., Whittington, C. & Lo, W.W. (2022). Nickel plating handbook. Toronto: Nickel institute, 103 p.
7. Fronæus, S. (1952). The equilibria between nickel and acetate ions. An ion exchange and potentiometric investigation // Acta chemica scandinavica, 6, 1200-1211. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.06-1200>.
8. Tanaka, N. & Kato, K. (1959). The formation constants of metal acetate complexes. I. Polarographic determination of the formation constants of acetatonicel (II) complexes // Bulletin of the chemical society of Japan, 32(5), 516-521. <https://doi.org/10.1246/bcsj.32.516>.
9. Filipović, I., Matusinović, T., Mauer, B., Piljac, I., Bach-Druginović, B. & Bujak, A. (1970). On the stability of formate, acetate, propionate, butirate, glycolate and chloroacetate complexes

of cobalt, nickel, copper, zinc, cadmium and lead // Croatica chemica acta, 42(4), 541-549.

10. Tedesco, P.H., De Rumi, V.B. & González Quintana, J.A. (1971). Polarographic and spectrophotometric study on nickel-acetate and nickel-propionate complexes // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 33(11), 3839-3846. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(71\)80292-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80292-0).
11. Bonsen, A., Eggers, F. & Knoche, W. (1976). Formation of nickel acetate complexes // Inorganic chemistry, 15(5), 1212-1215. <https://doi.org/10.1021/ic50159a048>.
12. Kuzminskaya, G.E., Kublanovskaya, A.I. & Kublanovskiy, V.S. (1979). Complex formation in the nickel(II)-acetate-water system // Ukrainian chemistry journal, 45, 941-944. (In Russ.).
13. Linder, P.W., Torrington, R.G. & Seemann, U.A. (1983). Formation constants for the complexes of levulinate and acetate with manganese(II), cobalt(II), nickel(II), copper(II), zinc(II) and hydrogen ions // Talanta, 30(4), 295-298. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(83\)80069-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(83)80069-1).
14. Smith, R.M. & Martell, A.E. (editors) (1989). Critical stability constants. V. 6. Second supplement. New York: Springer science+business media, 643 p.
15. Bickley, R.I., Edwards, H.G.M., Rose, S.J. & Gustar, R. (1990). A raman spectroscopic study of nickel(II) acetate, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ and its aqueous and methanolic solutions // Journal of molecular structure, 238, 15-26. [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(90\)85002-z](https://doi.org/10.1016/0022-2860(90)85002-z).
16. Strathmann, T.J. & Myleni, S.C.B. (2004). Speciation of aqueous Ni(II)-carboxylate and Ni(II)-fulvic acid solutions: Combined ATR-FTIR and ZAFS analysis // Geochimica et cosmochimica acta, 68(17), 3441-3458. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.012>.
17. Naboychenko, S.S., Lebed, A.B., Haritidi, E.Z., Hudya-kov, I.F., Plekhanov, K.A., Serebryakova, L.N. & Zhuravlev, V.D. (1984). Method of obtaining copper(II), nickel(II) or cobalt(II) acetates. USSR author's certificate No. 1097604. (In Russ.).
18. Mohamed, M.A., Halawy, S.A. & Ebrahim, M.M. (1993). Non-isothermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate // Journal of analytical and applied pyrolysis, 27(2), 109-110. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(93\)80002-H](https://doi.org/10.1016/0165-2370(93)80002-H).
19. Hussein, G.A.M., Nohman, A.K.H. & Attyia, K.M.A. (1994). Characterization of the decomposition course of nickel acetate tetrahydrate in air // Journal of the thermal analysis and calorimetry, 42. (6), 1155-1165. <https://doi.org/10.1007/BF02546925>.
20. De Jesus, J.C., González, I., Quevedo, A. & Puerta, T. (2005). Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques // Journal of molecular catalysis. A: Chemical, 228, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2004.09.065>.
21. Kamenshchikov, O.Yu., Ketov, A.A., Korzanov, V.S. & Krasnovskikh, M.P. (2018). Synthesis of dispersed nickel by thermal decomposition of formate, acetate and oxalate of nickel(II) // Bulletin of Perm university. Chemistry, 8(3), 278-285. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2018-3-278-285>.
22. Apelblat, A. & Manzurola, E. (1999). Solubilities of magnesium, calcium, barium, cobalt, nickel, copper, and zinc acetates in water from T = (278,15 to 348,15 K) // The journal of chemical thermodynamics, 31(10), 1347-1357. <https://doi.org/10.1006/jct.1999.0548>.
23. Ribeiro da Silva, M.A.V. & Santos, L.M.N.B.F. (2000). Standard molar enthalpies of formation of $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4.00\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ and $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2.00\text{H}_2\text{O}$ in crystalline state // The journal of chemical thermodynamics, 32(10), 1327-1334. <https://doi.org/10.1006/jct.2000.0681>.
24. Tappmeyer, W.P. & Davidson, A.W. (1963). Cobalt and nickel acetates in anhydrous acetic acid // Inorganic chemistry, 2(4), 823-825. <https://doi.org/10.1021/ic50008a039>.
25. Edwards, D.A. & Hayward, R.N. (1968). Transition metal acetates // Canadian journal of chemistry, 46(22), 3443-3446. <https://doi.org/10.1139/v68-572>.
26. van Niekerk, J.N. & Schoening, F.R.L. (1953). The crystal structure of nickel acetate, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, and cobalt acetate, $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ // Acta crystallographica, 6(7), 609-612. <https://doi.org/10.1107/S0365110X5300171X>.

27. Downie, T.C., Harrison, W., Raper, E.S. & Hepworth, M.A. (1971). A three-dimensional study of the crystal structure of nickel acetate tetrahydrate // *Acta crystallographica. Section B*, 27(3), 706-712. <https://doi.org/10.1107/S0567740871002802>.
28. Cramer, R.E., van Doorne, W. & Dubois, R. (1975). Crystal and molecular structure and isotropic hydrogen-1 nuclear magnetic resonance shifts of hexakis(acetic acid)nickel(II) tetrafluoroborate $[\text{Ni}(\text{AcOH})_6](\text{BF}_4)_2$ // *Inorganic chemistry*, 14(10), 2462-2466. <https://doi.org/10.1021/ic50152a034>.
29. Treushnikov, E.N., Kuskov, V.I., Aslanov, L.A. & Soboleva, L.V. (1980). Investigation of the electron-density distribution in nickel acetate tetrahydrate $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from x-ray diffraction data // *Kristallografiya*, 25(2), 287-293.
30. Nicolai, B., Kearley, G.J., Johnson, M.R., Fillaux, F. & Suard, E. (1998). Crystal structure and low-temperature methyl-group dynamics of cobalt and nickel acetates // *Journal chemical physics*, 109(20), 9062-9074. <https://doi.org/10.1063/1.477577>.
31. Tai, X.-S. (2012). Preparation and crystal structure nickel acetate tetrahydrate // *Advanced materials research*, 396-398, 1860-1863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.396-398.1860>.
32. Badea, G.E. & Badea, T. (2008). Electrochemical behavior of nickel in aqueous acetic acid solutions // *Revue Roumaine de chimie*, 53(4), 291-295.
33. Dong, M., Gabe, D.R., Hart, A.C. & Crouch, P.C. (2014). Further studies of the chemistry of nickel solutions // *Transactions of the IMF*, 92(2), 71-73. <https://doi.org/10.1179/0020296714Z.000000000167>.
34. Mougey, H.C. & Wirshing, R.J. (1944). Electrodeposition of nickel. U. S. Patent № 2338529.
35. Hodaboom, G.B. (1944). Nickel depositing bath and method. U. S. Patent № 2351966.
36. De Koye de Kastalet, G. (1972). Method for producing of electrolytic multilayer coating. Patent № 346885. USSR. (In Russ.).
37. Gluck, V. (1974). The buffering action of nickel acetate in a Watt's nickel bath // *Metal finishing*, 72(5), 96-98.
38. Popilov, L.Y. (1975). Advices for factory technologist. Reference book. Leningrad: Lenizdat publ., 264 p. (In Russ.).
39. Gluck, V. (1975). The buffering action of acetate in nickel plating solution // *Plating and surface finishing*, 62(9), 865-869.
40. Vaynilavichene, M., Shirvite, R.P. & Bodnevas, A.I. (1977). Nickel plating electrolyte. USSR author's certificate. No. 541901. (In Russ.).
41. Kudryavtsev, N.T., Tsupak, T.E. & Shinkareva, G.Ja. (1977). Use of nickel acetate as buffer additive for nickel plating electrolyte // *Proceedings of Mendelev Moscow chemical technology institute*, 95, 50-53. (In Russ.).
42. Kudryavtsev, N.T., Tsupak, T.E., Loseva, E.I. & Melnikov, V.V. (1979). The investigation of nickel electrodeposition from acetate electrolytes // *Theory and practice corrosion protection of metals*. Kuybishev. 57-58. (In Russ.).
43. Barnes, C. & Ward, J.J.B. (1979). Nickel plating. U.S. Patent № 4159926.
44. Kudryavtsev, N.T., Loseva, E.I., Tsupak, T.E. & Melnikov, V.V. (1980). The investigation of electrode processes of nickel electrodeposition from acetate electrolytes // *Bulletin of the Latvia SSR academy of sciences. Chemistry*, (3), 301-303. (In Russ.).
45. Tsupak, T.E., Bek, R.Yu., Loseva, E.I. & Borodikhina, L.I. (1982). The pH of the near-cathode layer in the electrolysis of nickel acetate-chloride solutions // *Electrochemistry*, 18(1), 86-92. (In Russ.).
46. Nguen, Z.Sh., Tsupak, T.E. & Gelfand, M.R. (1983). Properties of nickel deposits obtained from acetate chloride electrolyte // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 26(9), 1106-1109. (In Russ.).
47. Tsupak, T.E., Bek, R.Yu., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1983). Reasons for high permissible current density of nickel electrodeposition from acetate electrolyte // *Proceedings of Mendelev Moscow chemical technology institute*, 129, 32-40. (In Russ.).
48. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Hardness and structure of nickel electrodeposited from a nickel acetate - N,N-dimethylformamide - water bath // *Surface technology*, 21(3), 239-244. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(84\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0376-4583(84)90085-2).
49. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Hardness and structure of nickel electrodeposited from its sulphate and acetate salts in a 5mol.%N-methylformamide - water mixture // *Surface technology*, 22(3), 241-244. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(84\)90109-2](https://doi.org/10.1016/0376-4583(84)90109-2).
50. Tsupak, T.E., Andreev, I.N., Valeev, N.N. & Nguen, Z.Sh. (1985). Influence producing conditions on microhardness and internal stress of nickel galvanic coatings obtained from acetate solutions // *Journal of applied chemistry*, 58(2), 392-394. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSZAFH>.
51. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1985). Features of mass transport in the nickel plating acetate solutions // *Electrochemistry*, 21(9), 1190-1193. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSJVTN>.
52. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1985). Influence of hydrogen evolution on mass transport and pH of near-cathode layer in electrodeposition of nickel from acetate electrolyte // *Electrochemistry*, 21(10), 1346-1349. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSBBAZ>.
53. Gamburg, Yu.D., Nguen, F.N. & Tsupak, T.E. (1985). Physico-mechanical properties of nickel deposited from acetate electrolytes // *Electrochemistry*, 21(10), 1400-1403. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSJWFB>.
54. Gamburg, Yu.D., Nguen, F.N., Vashchenko, S.V. & Tsupak, T.E. (1985). Incorporation of hydrogen into nickel electrodeposited from acetate electrolyte solution // *Electrochemistry*, 21(10), 1403-1405. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/WGDRML>.
55. Abd El Wahaab, S.M., Abd El-Halim, A.M., Abd El Rehim, S.S. & Abd El Meguid, E.A. (1986). Effect of bath constituents and superimposed sinusoidal a. c. on nickel electroplating from acidic acetate solutions // *Surface and coating technology*, 29 (4), 313-324. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(86\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(86)90004-6).
56. Grilikhes, S.Ja. & Tikhonov, K.I. (1990). Electrolytic and chemical coatings. Theory and practice. Leningrad: Chemistry publ., 288 p. (In Russ.).
57. Tsupak, T.E., Kopteva, N.I., Bek, R.Yu. & Shuraleva, L.I. (1991). The reasons of high cathode current densities in the diluted nickel acetate solutions // *Electrodeposition of metals and alloys: Proceedings of Mendelev Moscow chemical technology institute*, 68-75. (In Russ.).
58. Dakhov, V.N., Tsupak, T.E., Kopteva, N.I., Kryshchenko, K.I. & Gamburg, Yu.D. (1993). Electrodeposition of nickel and nickel-phosphorus alloy from diluted acetate electrolytes // *Electroplating and surface treatment*, 2(3), 30-33. (In Russ.).
59. Krishnan, R.M., Eleankovan, T., Aruna, A., Sriveeraghavan, S., Jayakrishnan, S. & Natarajan, S.R. (1996). Effect of organic acids in nickel plating // *Bulletin of electrochemistry*, 12(5-6), 270-273.
60. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Shuraleva, L.I. & Kopteva, N.I. (1996). Low-waste environmentally friendly acetate-chloride electrolytes for nickel electrodeposition // *Chemistry for sustainable development*, 4(2), 101-105. (In Russ.).
61. Law, H.H., Schneemeyer, L.F. & Wu, T.-S. (1998). Electroplating of nickel on nickel ferrite devices. U. S. Patent No. 5779873.
62. Sultan, S. (2006). Pulse plated nickel electrodeposits // *Materials science research India*, 3(3A), 47-54. <https://doi.org/10.13005/msri/031a05>.
63. Tsupak, T.E. & Kryshchenko, K.I. (2006). Prospects for application in instrument engineering of nickel coatings obtained from nickel acetate base electrolytes // *Proceedings of scientific and practical conference «Galvanic and special coatings for electronic engineering»*. Moscow. Mendelev Moscow chemical technology university publishing centre, 65-67. (In Russ.).
64. Peganova, N.V. & Tsupak, T.E. (2007). Electrodeposition of nickel from dilute acetate-chloride bath using pulse current // *Electroplating and surface treatment*, 15(4), 18-24. (In Russ.).
65. Marikkannu, K.R., Surya Kala, K., Paruthimal Kalaignan, G. & Vasudevan, T. (2008). Electroplating of nickel from acetate based bath - Hull cell studies // *Transactions of the IMF*, 86(3), 172-176. <https://doi.org/10.1179/174591908X304153>.
66. Srivastav, H.K. & Aarti, Pandey. (2008). Effect of temperature on physical characteristics of nickel electrodeposited from

nickel salts in presence 1,4-dioxane-aqueous bath // Asian journal of chemistry, 20(1), P. 37-42.

67. Zuen, W.T., Dolgikh, O.V., Sotskaya, N.V. & Kotlyarova, E.A. (2009). Kinetics of nickel electrodeposition from solution with different anions // Condensed matter and interphases, 11(1), 37-46. (In Russ.).

68. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2011). Electrodeposition of nickel coatings from acetate electrolytes // Proceedings of BSTU, (3), 20-23. (In Russ.).

69. Srinivasan, R. & Bapu, G.N.K.R. (2011). Characterisation of nickel deposits from nickel acetate bath // Transactions of the IMF, 89(5), 275-280. <https://doi.org/10.1179/174591911X13123681387603>.

70. Antikhovich, I.V., Krupnik, S.M., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2012). Electrochemical deposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte in pulse regime // Proceedings of BSTU, (3), 8-12. (In Russ.).

71. Srinivasan, R. & Bapu, G.N.K.R. (2013). Effect of additives on electrodeposition of nickel from acetate bath: cyclic voltammetric study // Transactions of the IMF, 91(1), 52-56. <https://doi.org/10.1179/00202967122.0000000062>.

72. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2013). Influence of pulse regime electrolysis on properties of nickel coatings obtained from low concentrated acetate-chloride electrolyte // Bulletin of StPbSIT (TU), 20(46), 30-34. (In Russ.).

73. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2014). Electrochemical deposition of nickel from acetate-chloride electrolytes with ammonium acetate // Bulletin of BSU. Section 2, (1), 15-20. (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/108979>.

74. Krasikov, A.V. & Ezhov, A.A. (2015). Water-based electrolyte for nickelising products from steel, aluminium, titanium, copper and their alloys. Patent № 2543584 Russian Federation. (In Russ.).

75. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A., Zharskiy, I.M. & Bolvako, A.K. (2015). Electrodeposition of a nickel coating from a low-temperature acetate-chloride nickel-plating electrolyte // Russian journal of electrochemistry, 51(3), 281-285. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1023193515030027>.

76. Sekar, R., Jagadesh, K.K. & Bapu, G.N.K.R. (2015). Microstructure and corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline nickel prepared from acetate bath // Korean journal of chemical engineering, 32(6), 1194-1200. <https://doi.org/10.1007/S11814-014-0289-7>.

77. Ivshin, Ja.B. (2016). Copper electrodeposition on pre-nickel steel from acid sulfate electrolytes // Herald of technological university, 19(9), 105-107. (In Russ.).

78. Ivshin, Ja.V., Shaykhtudinova, F.N. & Sycoev, V.A. (2017). Electrodeposition of copper on mild steel. Process features // Electronic processing of materials, 53(4), 20-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053749>.

79. Mech, K. (2017). Influence of organic ligands on electrodeposition and surface properties of nickel film // Surface and coating technology, 315, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.042>.

80. Makarova, I.V., Kurilo, I.I. & Chernik, A.A. (2017). Mechanism of nickel ions reduction from acetate electrolytes // Herald of technological university, 20(24), 18-21. (In Russ.).

81. Lipschutz, M. (2019). Environmentally friendly nickel electroplating compositions and methods. U. S. Patent No. 10508348.

82. Lipschutz, M. (2019). Nickel electroplating compositions with copolymers of arginine and bisepoxides and method of electroplating nickel. Eur. Patent No. 3428322.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

83. Kireev, S.Yu. & Frolov, A.M. (2021). Electrodeposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte using galvanostatic pulse electrolysis // Protection of metals and physical chemistry of surfaces, 57(7), 1375-1379. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2070205121070078>.

84. Frolov, A.M. & Kireev, S.Yu. (2021). Reversible galvanostatic mode of deposition of nickel coatings from an acetate-chloride electrolyte // Advances in chemistry and chemical technology, 35(5), 57-59 (In Russ.). eLIBRARY ID:46633674. EDN://elibrary.ru/RNKPWA.

85. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Electrodeposition of nickel from formamide // Surface technology, 21(3), 233-238. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(84\)90084-0](https://doi.org/10.1016/0376-4583(84)90084-0).

86. Srivastava, H.K. & Tikoo, P.K. (1987). Effect of cobalt, cadmium and ammonium ions on the electrodeposition of nickel from dimethylsulfoxide/nickel acetate // Plating and surface finishing, 74(2), 67-70.

87. Srivastava, H.K. & Tikoo, P.K. (1988). Bright and hard electrodeposits of nickel from nickel acetate-formamide bath // Materials science and technology, 4(9), 836-843. <https://doi.org/10.1179/mst.1988.4.9.836>.

88. Srivastava, H.K. (1989). Physico-mechanical properties of nickel electrodeposited from nickel acetate-amide baths // Materials science and technology, 5(12), 1229-1235. <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.12.1229>.

89. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Chromium, nickel and welding, (1990). (49), 257-445.

90. Barceloux, D.G. & Barceloux, D. (1999). Nickel // Journal of toxicology: clinical toxicology, 37(2), 239-258. <https://doi.org/10.1081/CLT-100102423>.

91. Afonin, E.G. (2005). Method for preparing nickel oxalate. Patent No. 2256647. Russian Federation. (In Russ.).

92. Afonin, E.G. (2014). Method of obtaining nickel(II)-ammonium phosphates. Patent No. 2535834. Russian Federation. (In Russ.).

93. Afonin, E.G. (2014). Nickel(+2) recovery from spent nickel electroplating and electroless plating solutions in the form of ammonium nickel phosphates // Science intensive technologies, 15(6), 34-40. (In Russ.).

94. Afonin, E.G. (2015). Nickel(+2) recovery from spent nickel electroplating and electroless plating solutions by chemical reagents treatments // Proceedings of the 14th Russian scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems». Kaluga, Noosfera publ., 374-382. (In Russ.).

95. Avci, E. (1989). Electrolytic recovery of nickel from dilute solutions // Separation science and technology, 24(3-4), 317-324. <https://doi.org/10.1080/01496398908049770>.

96. Coman, V., Robotin, B. & Ilea, P. (2013). Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review // Resources, conservation and recycling, 73, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.

Информация об авторе

Е. Г. Афонин – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств.

Information about the author

E.G. Afonin - candidate of chemical sciences, senior researcher, Kaluga research institute of telemechanical devices.